

Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE
TUBULAÇÕES DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Felipe Gautério Leal

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JUNHO/2009

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE
TUBULAÇÕES DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Felipe Gautério Leal

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**Orientador
Prof. Dr. Peter Batista Cheung**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JUNHO/2009**


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

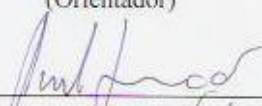
**DETERMINAÇÃO DO TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO DE
TUBULAÇÕES DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**


FELIPE GAUTÉRIO LEAL

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental - TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Peter Batista Cheung
(Orientador)

Prof. Dr. Davide Franco
(Membro da banca)

Eng. Álvaro B. H. Silva
(Membro da banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JUNHO/2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Maurício e Lourdes, pelo apoio e incentivo incondicional que me deram.

Agradeço ao Prof. Peter Batista Cheung, pela oportunidade de trabalhar no Laboratório e pelas suas contribuições para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço a todas as pessoas do SIMAE – Capinzal / Ouro, em destaque o Sr. Ademar de Giacometi pelo total apoio para a realização desse trabalho, e Gilberto, pela disponibilização dos dados.

Aos colegas de laboratório, RESAN e LAHIMAR, pelo ambiente de aprendizado. Ao Matemático Gilmar pelas valiosas dicas.

A Vanessa, Sheila, Guilherme e Bruno, pela amizade.

RESUMO

LEAL, F.G. Determinação do tempo ótimo de substituição de tubulações de sistemas de abastecimento de água. Florianópolis, 2009, 53p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

A gestão eficiente das tubulações em sistemas de abastecimento de água é indispensável para que as características do sistema se conservem. Rompimentos causam decréscimo da capacidade hidráulica da rede, aumento da taxa de quebras, decréscimo da confiabilidade da rede, aumento de reclamações por parte dos consumidores e diminuição da qualidade da água do sistema, etc. Pelo fato das tubulações estarem enterradas sua gestão é dificultada, sendo inviável a análise em campo do estado destas. Quando uma tubulação quebra existem dois caminhos para se lidar com tal situação: reparar ou substituir. De posse de registros históricos de quebras dos tubos foi utilizada análise de regressão para determinar uma equação que expresse o aumento no número de quebras com o tempo. Esta equação foi usada para determinar o tempo ótimo de operação das tubulações do ponto de vista econômico, fornecendo assim uma ferramenta de apoio para o planejamento das companhias de saneamento. O método aplicado se mostrou eficaz se a equação obtida através da regressão for válida estatisticamente, pois forneceu uma data ótima de operação das tubulações do trecho em estudo.

Palavras-chave: Abastecimento de água, tubulações, tempo ótimo de substituição.

ABSTRACT

LEAL, F.G. Scheduling pipe replacement determination in water supply systems.

Florianópolis, 2009, 53p. Work of conclusion's course at Sanitary and Environment Engineering – Federal University of Santa Catarina.

Efficient pipes management in water supply systems is indispensable for conservation of the system's characteristics. Breaks cause reduction of hydraulic capacity in pipe network, increase the breaks rates, decrease the network reliability, increase consumer's complains and affects water quality. The management of pipes is hard to be made because they are buried, what turns analysis in field about their status impracticable. When a pipe breaks, there are two ways to lead the situation: to repair it or to replace it. Having historic data about breaks in pipes, a regression analysis was made to determinate an equation that express the number of breaks as a function of time. This equation was used to determinate the scheduling pipe replacement under economic point of view, providing a support tool for sanitation companies management. The applied method has shown effective, because the analysis provided the scheduling pipe replacement in path studied.

Keyword: Water supply system, regression analysis, scheduling pipe replacement

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Gestão sustentável de componentes de infra-estrutura de água: a visão (Alegre,2006).....	14
4.1 – Sistema de abastecimento de água.....	16
4.2 - Curva da banheira do ciclo de vida de tubulações enterradas.....	20
5.1 – Município de Capinzal.....	24
5.2 – Município de Capinzal.....	25
5.3 – Simae Capinzal / Ouro.....	25
6.1 - Evolução das quebras e linha de tendência (software <i>Statistica</i>).....	32
6.2 – Evolução das quebras com o tempo.....	33
6.3 – Evolução das quebras e intervalo de confiança.....	34
6.4 – Valor presente dos custos de manutenção.....	36
6.5 – Valor presente dos custos de substituição.....	37
6.6 – Custo total $PT(t_r)$	38
6.7 – Custo total $PT(t_r)$, com seus componentes $Pr(t_r)$ e $Pm(t_r)$, e o ano ótimo de substituição – 2012,3.....	39

LISTA DE QUADROS

1.1 - Fatores que causam quebras em tubulações.....	19
---	----

LISTA DE TABELAS

6.1 – Distribuição das quebras por meses do ano.....	31
6.2 – Número de quebras/1,58Km.Ano.....	32
6.3 – Comparação entre o número de quebras estimado e observado.....	34
6.4 – Quantidades de quebras e custo de reparação no tempo.....	35
6.5 – Índices de inflação.....	36
6.6 – Dados de entrada para cálculo do tempo ótimo de substituição.....	38
6.7 – Custos de manutenção, substituição e custos totais com o tempo.....	40
6.8 – Análise de sensibilidade.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIMAE	Serviço intermunicipal de água e esgoto
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
ETA	Estação de tratamento de água
DeFoFo	Diâmetro externo de Ferro Fundido
IPCA	Índice nacional de preços ao consumidor amplo
INPC	Índice nacional de preços ao consumidor

LISTA DE SÍMBOLOS

$N(t)$	Número de quebras por unidade de comprimento por ano no ano t
t	Tempo em anos
A	Taxa para o incremento nas quebras sobre tempo
C_b	Custo de um único reparo de quebra (R\$)
C_r	Custo de substituição de uma tubulação (R\$)
t_r^*	Ano ótimo de substituição da tubulação
L	Comprimento do tubo (Km)
R	Taxa de inflação
x_i, y_i	Parâmetros de regressão
NY	Número de anos desde a instalação até o primeiro reparo
D	Diâmetro da tubulação
P	Pressão absoluta interior da tubulação
I	% de tubos sob áreas de desenvolvimento industrial
RES	% de tubos sob áreas de desenvolvimento residencial
LH	Comprimento das tubulações em solo altamente corrosivo
T	Tipo do tubo (1=metálico, 0=concreto armado)
REP	Número de reparos
PRD	Pressão diferencial
DEV	% do comprimento de tubos em solos de baixa e moderada corrosividade
SL	Área superficial de tubulações em solos com baixa corrosividade
SH	Área superficial de tubulações em solos com alta corrosividade
N	Número de quebras por ano
Age	Idade da tubulação na primeira quebra (anos)
SR	Resistividade do solo saturado (ohm-cm)
pH	pH do solo
r_d	Potencial redox
P	Probabilidade recíproca de dias sem quebras
t_p	Ano presente
t_r	O ano na qual a tubulação será substituída
C_b	Custo de reparação de uma quebra
C_r	Custo de substituição de um trecho de tubulações (R\$)

$C_m(t)$	Valor presente do custo de manutenção
$P_m(t)$	Valor presente de todos os custos de manutenção
$PT(t)$	Custo total
$P_r(t)$	Valor presente de reposição de um trecho de tubulações no ano t

SUMÁRIO

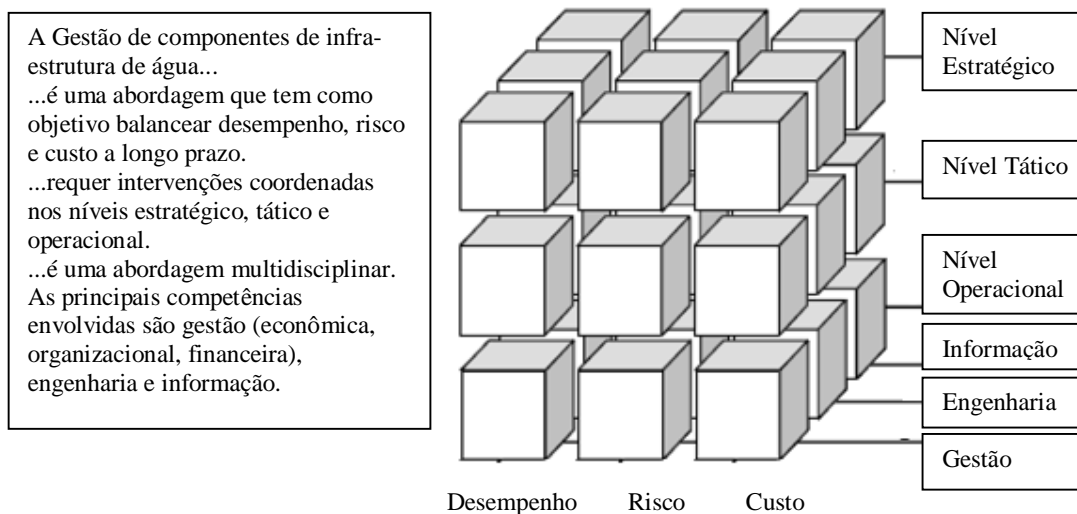
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	<u>14</u>
<u>2. OBJETIVOS:.....</u>	<u>15</u>
2.1 PRINCIPAL.....	15
2.2 ESPECÍFICOS.....	15
<u>3. JUSTIFICATIVA:.....</u>	<u>16</u>
<u>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>16</u>
4.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	16
4.2 PREVISÃO DE QUEBRAS NAS TUBULAÇÕES.....	20
<u>5. METODOLOGIA.....</u>	<u>24</u>
5.1 LOCAL DE ESTUDO	24
5.1.1 LOCALIZAÇÃO.....	24
5.1.2 MUNICÍPIO DE CAPINZAL.....	24
5.1.3 SIMAE	25
5.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	26
5.3 ESCOLHA DO LOCAL E TRECHO DE ESTUDO.....	26
5.4 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES CADASTRAIS.....	26
5.5 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO EM ESTUDO.....	27
5.6 MÉTODO PARA PREVISÃO DE QUEBRAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO.....	27
5.7 ANÁLISE ECONÔMICA.....	28
5.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	30
<u>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	<u>31</u>
6.1 ANÁLISE DOS DADOS DE QUEBRAS	31
6.2 ANÁLISE ECONÔMICA.....	34
<u>7. CONCLUSÕES</u>	<u>41</u>
<u>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>43</u>

1. INTRODUÇÃO

A infra-estrutura de uma Companhia de Água é constituída de componentes de vida útil finita, sendo que cada elemento é parte de um sistema integrado, onde o comportamento de cada um afeta o desempenho do sistema como um todo. Uma gestão eficiente desses componentes é dificultada pelo fato de a maior parte dos mesmos estar enterrados, acrescentando um grau de complexidade ao problema, devido à dificuldade em avaliar a sua condição.

A gestão dos componentes da infra-estrutura de água pode ser definida segundo Brown e Humphrey (2005), como a arte de equilibrar desempenho, custo e risco. Alcançar este equilíbrio requer o apoio de três pilares de competência: gestão, engenharia e informação. Alegre et al (2006), apresenta uma visão sustentável para a gestão de componentes, como mostra a Figura 1.1.

Figura 1.1 – Gestão sustentável de componentes de infra-estrutura de água: a visão (Alegre, 2006).



As redes de distribuição de água freqüentemente representam mais de 80% das despesas envolvidas com o Sistema de Abastecimento de Água (Kleiner e Rajani, 2001). As tubulações sofrem um processo de deterioração que além dos custos envolvidos com seus reparos, levam a uma miríade de problemas estruturais e funcionais, tais como o decréscimo da capacidade hidráulica da rede, o aumento da taxa de quebras, o decréscimo da confiabilidade da rede, o aumento de reclamações por parte dos consumidores e a diminuição da qualidade da água do sistema.

Devido à falta de procedimentos e metodologias para a escolha das tubulações a serem substituídas, e reconhecendo que a inspeção em campo de todo um sistema de distribuição de água é logisticamente e economicamente inviável, as Companhias de Água baseiam suas decisões em uma base ampla de fatores que incluem a idade do tubo, o material, o histórico de manutenção e as reclamações dos consumidores (Rogers e Grigg, 2006).

Embora esse processo de decisão subsidie as Companhias de um mecanismo de priorização, ele possui diversas limitações que reprimem sua eficácia, pois abordagens de base ampla simplificam um processo de deterioração altamente complexo, na qual freqüentemente levam a atividades de reposição em que tubos com vida útil remanescente suficiente são removidos do serviço prematuramente, e de modo oposto, tubos que deveriam ter sido substituídos são mantidos em serviço (Rogers e Grigg, 2006).

Para preencher essa lacuna e auxiliar no processo de decisão das Companhias de Saneamento, tornando-o mais transparente, é proposto o uso de um método analítico que usa registros históricos das quebras das tubulações para identificar padrões. Assumindo que esses padrões históricos continuarão, equações de previsão de quebras podem ser formuladas, e a partir destas podem ser estimadas taxas de quebras das tubulações que servirão de base para a análise econômica que determina o tempo ótimo de operação. O estudo será desenvolvido a partir das ordens de serviço fornecidas pelo Serviço Intermunicipal de Água e Esgoto – SIMAE, de Capinzal e Ouro, municípios do meio-oeste do estado de Santa Catarina. O SIMAE é uma empresa pública que presta serviços a população na área de saneamento, sendo o alvo do estudo as tubulações de uma adutora do sistema de abastecimento de água.

2. OBJETIVOS:

2.1 Principal: Este trabalho tem por objetivo determinar o tempo ótimo de substituição das tubulações de uma adutora do sistema de abastecimento de água do município de Capinzal.

2.2 Específicos:

- Identificar os métodos empregados na literatura científica;
- Desenvolver uma equação para a previsão das quebras no futuro no trecho em estudo;

- Determinar o tempo ótimo de operação das tubulações do ponto de vista econômico;
- Realizar uma análise de sensibilidade em relação ao parâmetro tempo ótimo;
- Disponibilizar os dados para o SIMAE.

3. JUSTIFICATIVA:

Fornecer uma ferramenta que auxilie as Companhias de Água na tomada de decisão acerca da gestão das tubulações do sistema de abastecimento de água, com uma base analítica e não puramente empírica, visto que representam considerável parcela dos custos envolvidos com o sistema.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Sistema de abastecimento de água

Segundo Gomes (2004) um sistema de abastecimento de água é o conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água a comunidades, para fins de consumo doméstico, industrial e público. Este sistema constitui-se basicamente da captação de água de algum manancial, do seu tratamento e posterior distribuição por gravidade aos consumidores através de reservatórios em zonas mais baixas e através de bombeamento em zonas mais altas. A figura 4.1, abaixo, mostra a configuração geral de um sistema de abastecimento de água.

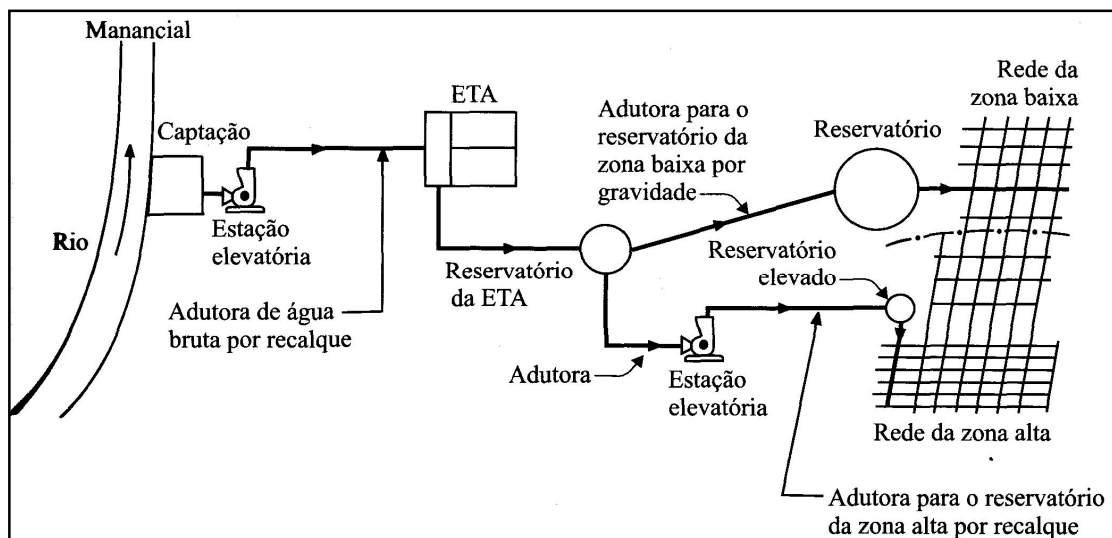


Figura 4.1 – Configuração geral de um sistema de abastecimento de água (Orsini, 1996).

Um sistema de abastecimento de água, segundo Tsutiya (2006), é formado pelas seguintes partes:

- **Manancial:** é o corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento. Deve fornecer vazão suficiente para atender a demanda de água no período de projeto, e a qualidade dessa água deve ser adequada sob o ponto de vista sanitário.
- **Captação:** conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto ao manancial, para a retirada da água destinada ao sistema de abastecimento.
- **Estação elevatória:** conjunto de obras e equipamentos destinados a recalcar a água para a unidade seguinte. Em sistemas de abastecimento de água, geralmente há várias estações elevatórias, tanto para o recalque de água bruta, como para o recalque de água tratada. Também é comum a estação elevatória tipo “booster”, que se destina a aumentar a pressão e/ou vazão em adutoras ou redes de distribuição de água.
- **Adutora:** canalização que se destina conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição. Não distribuem água aos consumidores.
- **Estação de tratamento de água:** conjunto de unidades destinado a tratar a água de modo a adequar as suas características aos padrões de potabilidade.
- **Reservatório:** é o elemento do sistema de distribuição de água destinado a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição.
- **Rede de distribuição:** parte do sistema de abastecimento de água formada de tubulações e órgãos acessórios, destinada a colocar água potável a disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada.

O sistema de distribuição de água, com adutoras e redes, é em geral, o componente mais caro de um sistema de abastecimento, e frequentemente representa mais de 80% das despesas envolvidas (Kleiner e Rajani, 2001). A deterioração das tubulações resulta em custos elevados de manutenção, redução da qualidade da água, decréscimo da capacidade hidráulica da rede e reclamações por parte dos consumidores, dentre outros.

O planejamento para a reabilitação e substituição de tubulações é indispensável para a manutenção da qualidade dos serviços por parte das companhias de saneamento. A habilidade para entender e quantificar os mecanismos de deterioração das tubulações é parte essencial dos procedimentos de planejamento.

As causas dos rompimentos em tubulações têm sido identificadas por diversos autores (Morris, 1967; Shamir e Howard, 1979; Goulter e Kazemi, 1988). Uma variedade de fatores que causam as quebras tem sido reportados e, Morris (1967), sugere um número de possíveis causas para as mesmas, mas enfatiza que “a causa de uma quebra numa tubulação nem sempre pode ser identificada”.

As mais importantes variáveis que descrevem a deterioração estrutural das tubulações de um sistema de abastecimento de água podem ser agrupadas em quatro categorias, segundo Rostum (2000):

- Físicas ou estruturais;
- Ambientais ou externas;
- Hidráulicas ou internas;
- De manutenção.

Uma lista de possíveis fatores que causam quebras em tubulações é proposta por Rostum (2000), e vem apresentada no quadro 4.1. A maioria dos fatores é constante no tempo, mas alguns podem ser tempo-dependentes, como por exemplo, a qualidade da água, carregamentos externos e velocidade da água.

Quadro 4.1 - Fatores que causam quebras em tubulações (Rostum, 2000).

Variáveis físicas ou estruturais	Variáveis ambientais ou externas	Variáveis Hidráulicas ou internas	Variáveis de manutenção
Localização da tubulação	Tipo de solo	Velocidade da água	Data da falha
Diâmetro	Carregamento	Pressão água	Data do reparo
Comprimento	Águas subterrâneas	Qualidade da água	Localização da falha
Ano de construção	Taxa de vazamentos	Transientes hidráulicos	Tipo de falha
Material do tubo	Outras redes	Corrosão interna	Histórico de falhas
Tipo de junta	Temperatura		
Proteção interna	Corrosão externa		
Proteção externa			
Classe de pressão			
Espessura da parede			
Profundidade de assentamento			

O ciclo de vida de uma tubulação enterrada é freqüentemente descrito pela chamada “curva da banheira”, apresentada por Kleiner e Rajani (2001), como ilustrado na figura 4.2.

A primeira fase deste ciclo, também conhecida por “fase de queima”, descreve o período diretamente após a instalação da tubulação, na qual as quebras ocorrem principalmente como um resultado de má instalação e tubulações defeituosas, sendo que surgem gradualmente e decrescem com o tempo.

Uma vez que o sistema está “limpo” desses “problemas de infância”, a tubulação entra na fase dois, conhecida por “fase de uso”, na qual o tubo opera relativamente livre de problemas, com uma freqüência de quebras baixa, resultante de fenômenos aleatórios tais como um eventual carregamento pesado sobre a tubulação, interferências de outras partes, etc.

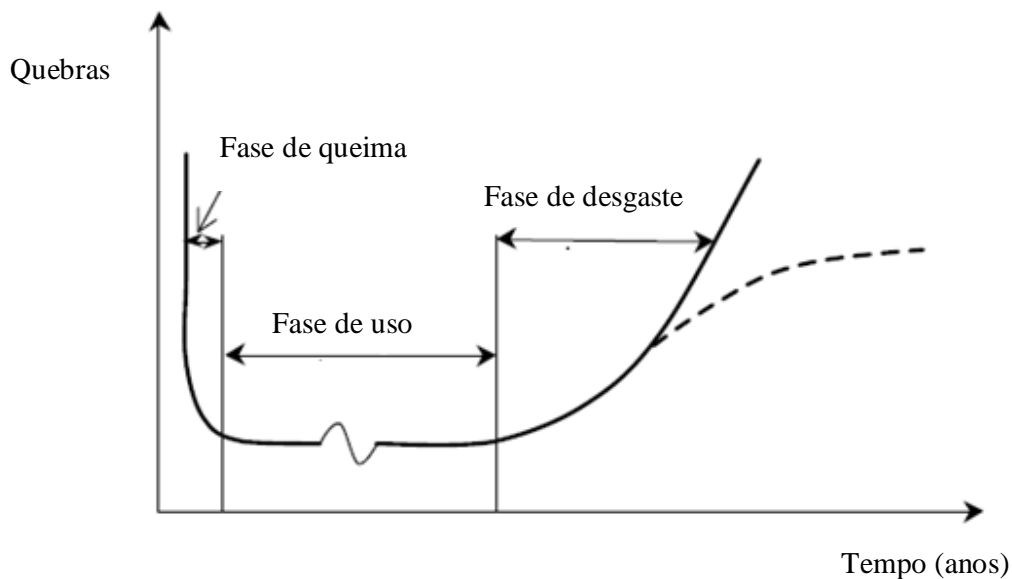


Figura 4.2 - Curva da banheira do ciclo de vida de tubulações enterradas (Kleiner e Rajani, 2001).

A terceira fase, também chamada de “fase de desgaste” descreve um período de acréscimo da frequência de quebras devido à deterioração das tubulações e a sua idade. Nem toda tubulação experimenta cada fase e o comprimento das fases pode variar dramaticamente para várias tubulações e sobre várias condições.

4.2 Previsão de quebras nas tubulações

Quando um trecho de tubulação mostra uma suscetibilidade crescente para quebrar, existem essencialmente dois caminhos para se lidar com tal situação: reparar ou substituir a tubulação. Uma decisão racional para substituir ou não uma tubulação em um tempo particular deve ser baseada na comparação de duas alternativas: substituir a tubulação, incorrendo nos custos de reposição e os custos futuros associados ao novo trecho, ou manter a tubulação existente, pelo menos por enquanto, poupando os custos de reposição mas incorrendo em possíveis custos futuros de reparo, interrupção do serviço e danos (Shamir e Howard, 1979).

Para que tal decisão seja tomada sobre adequado embasamento técnico e não em bases puramente empíricas, foram desenvolvidos modelos analíticos para a previsão de quebras nas tubulações, que usam os registros históricos dos rompimentos para identificar padrões. Assumindo que esses padrões históricos continuarão no futuro,

modelos para a previsão de quebras podem ser formulados. A seguir são apresentados os modelos analíticos reunidos da literatura científica.

Shamir e Howard (1979) propuseram o uso da análise de regressão para obter um modelo de previsão de quebras (4.1), que relaciona a ruptura de uma tubulação com o expoente de sua idade, recomendando que a análise de regressão seja aplicada a grupos de tubulações que tenham homogeneidade com respeito aos fatores que influenciam suas quebras.

$$N(t) = N(t_0).e^{A(t-t_0)} \quad (4.1)$$

Onde:

- $N(t)$ é o número de quebras por unidade de comprimento por ano no ano t ($Km^{-1}.ano^{-1}$);
- t , é tempo em anos;
- t_0 é o ano base para a análise (o ano no qual a tubulação foi instalada, ou o primeiro ano no qual dados estão disponíveis);
- A é a taxa para o incremento nas quebras sobre tempo (ano^{-1});

Shamir e Howard (1979) usaram o modelo exponencial para analisar o custo de substituição das tubulações em termos do valor presente do reparo de quebras e do capital de investimento. Na análise definem um tempo ótimo para substituição quando o custo em 4.2 é minimizado:

$$C(T) = C_r.e^{-R.T} + \int_0^T L.C_b.N(t_0).e^{A(t+g)}.e^{-R.t}.dt \quad (4.2)$$

onde:

- C_b = Custo de um único reparo de quebra (\$);
- C_r = Custo de substituição de uma tubulação (\$/Km);
- T = ano de substituição da tubulação;
- L = comprimento do tubo (Km);
- R = taxa equivalente de redução contínua;
- g = idade da tubulação no tempo t .

Walski e Pellicia (1982) incorporaram dois fatores adicionais ao modelo proposto por Shamir e Howard, como vemos em (4.3):

$$N(t) = C_1.C_2N(t_0).e^{A(t+g)} \quad (4.3)$$

onde:

- C_1 = razão entre {frequência de quebra com ferro fundido (nenhum/um ou mais) quebras prévias} e {frequência de quebra geral por ferro fundido}.
- C_2 = Razão entre {frequência de quebras por buraco de tubos fundidos com 500 mm de diâmetro} e {frequência quebras global para tubos fundidos com buraco};

Clarck (1982) propôs um modelo de duas fases, pois ele observou um intervalo entre o ano de instalação do tubo e sua primeira quebra, conseqüentemente propôs uma relação linear para prever o tempo decorrido para a primeira quebra (4.4) e uma equação exponencial (4.5) para prever o número de quebras subseqüentes.

$$NY = x_1 + x_2D + x_3P + x_4I + x_5RES + x_6LH + x_7T \quad (4.4)$$

$$REP = y_1.e^{y_2.t}.e^{y_3.T}.e^{y_4.PRD}.e^{y_5.DEV}.SL^{y_6}.SH^{y_7} \quad (4.5)$$

onde:

- x_i, y_i = parâmetros de regressão;
- NY = número de anos desde a instalação até o primeira quebra;
- D = diâmetro da tubulação;
- P = pressão absoluta interior da tubulação;
- I = % de tubos sob áreas de desenvolvimento industrial;
- RES = % de tubos sob áreas de desenvolvimento residencial;
- LH = comprimento das tubulações em solo altamente corrosivo;
- T = tipo do tubo (1=metálico, 0=concreto armado);
- REP = número de reparos;
- PRD = pressão diferencial;
- t = idade do tubo desde a primeira quebra;
- DEV = % do comprimento de tubos em solos de baixa e moderada corrosividade;
- SL = área superficial de tubulações em solos com baixa corrosividade;
- SH = área superficial de tubulações em solos com alta corrosividade;

Kettler e Goulter (1985) sugeriram uma relação linear (4.6) entre a quebra nas tubulações e sua idade.

$$N = x_1.Age \quad (4.6)$$

onde:

- N = número de quebras por ano;
- x_1 = parâmetro de regressão;

McMullen (1982) propôs uma relação linear (4.7) para prever o tempo para a primeira quebra de uma tubulação.

$$Age = 65,78 + 0,028.SR - 6,338.pH - 0,049.r_d \quad (4.7)$$

onde:

- Age = idade da tubulação na primeira quebra (anos);
- SR = Resistividade do solo saturado (ohm-cm);
- pH = pH do solo;
- r_d = Potencial redox (milivolts);

Jacobs e Karney (1994) aplicaram a regressão linear em 390 km de tubulações com diâmetro de 150 mm, divididas em três grupos de idade para obter uma relativa homogeneidade entre os tubos, e aplicaram a equação (4.8).

$$P = x_1 + x_2.lenght + x_3.Age \quad (4.8)$$

onde:

- P = probabilidade recíproca de dias sem quebras;
- x_1, x_2, x_3 = coeficientes de regressão.

5. METODOLOGIA

5.1 Local de estudo

5.1.1 Localização

O estudo foi desenvolvido no município de Capinzal, localizado na Mesorregião do Oeste Catarinense, mais precisamente na Microrregião de Joaçaba. A cidade fica à margem esquerda do rio do Peixe, a 442 km da capital do estado, Florianópolis, possuindo as seguintes coordenadas geográficas: 27°20'28" de latitude sul e 51°36'43" de longitude oeste do meridiano de Greenwich. Na Figura 5.1, podemos localizar a cidade em âmbito nacional e estadual.



Figura 5.1 – Município de Capinzal e Rio do Peixe (Google Earth, 2009).

5.1.2 Município de Capinzal

O município de Capinzal (Figura 5.2) foi fundado no ano de 1949, de colonização italiana e conta com 334 km² de área, possuindo 19.953 habitantes segundo dado do censo do IBGE, ano base 2007, possuindo clima mesotérmico úmido, com verão quente e temperatura média de 18,1°C. Está situado a 447 metros acima do nível do mar e tem como cidades vizinhas Zortéa, Ouro, Lacerdópolis e Erval Velho. Sua economia é baseada na agricultura e criação de aves e suínos.



Figura 5.2 - Município de Capinzal (acervo do autor, 2009).

5.1.3 SIMAE

O SIMAE – Serviço Intermunicipal de Água e Esgoto (Figura 5.3), é uma Autarquia intermunicipal, responsável pelo abastecimento de água e coleta de esgotos nos municípios de Capinzal e Ouro. A Autarquia foi criada em fevereiro de 1972, através das Leis N° 654 e N° 179, das Prefeituras Municipais de Capinzal e Ouro, sendo que entrou em operação em abril de 1974. O SIMAE atende praticamente 100% da população urbana com água tratada, proveniente do Rio do Peixe (figura 5.1), e nas comunidades do interior dos municípios, através de poços artesianos.



Figura 5.3 – SIMAE - Capinzal / Ouro (acervo do autor, 2009).

5.2 Funcionamento do sistema

O sistema de abastecimento de água do SIMAE atende a 26.000 pessoas nos municípios de Capinzal e Ouro. A captação de água é realizada no Rio do Peixe, sendo sua nascente principal localizada no município de Calmon-SC a uma altitude de 1.250m. Sua foz encontra-se a altitude de 387 m, em Alto Bela Vista, no reservatório de acumulação de água formado para a geração de energia da hidrelétrica de Itá, no Rio Uruguai (LINDNER, 2007).

A água captada do rio é então recalçada por duas bombas que a levam até a Estação de Tratamento de Água – ETA, localizada anexo à sede administrativa da Companhia, em Capinzal. O tratamento utilizado para potabilizar a água é do tipo convencional, sendo a vazão máxima de tratamento de 90 L/s, sendo que atualmente a estação opera com 75 L/s. Depois do tratamento, a água é distribuída ao sistema através de 10 estações elevatórias e 16 reservatórios.

5.3 Escolha do local e trecho de estudo

O SIMAE de Capinzal/Ouro foi escolhido para a realização deste estudo devido à existência de dados referentes aos registros de quebras das tubulações do sistema de abastecimento de água, através do histórico das ordens de serviço da companhia. Um trecho do sistema, uma adutora, foi escolhido para ser analisado, pois apresenta elevado índice de rompimentos e os dados referentes a ela puderam ser separados dos demais.

5.4 Levantamento de informações cadastrais

Para cada conserto efetuado no sistema de abastecimento é emitida uma ordem de serviço e a mesma é digitalizada e armazenada em um banco de dados eletrônico, que possui um histórico de cinco (5) anos. Um exemplo de ordem de serviço pode ser observada no Apêndice 3.

Da análise das ordens de serviço, as seguintes informações foram retiradas para desenvolver a equação de previsão de quebras com o tempo e a análise econômica:

- Quantidade de consertos efetuados, divididos por mês e ano;
- Custo dos reparos, divididos em material utilizado e mão-de-obra.

O SIMAE disponibilizou as ordens de serviço através de documentos impressos, gerados a partir do banco de dados eletrônico, totalizando $n_{total}=75$ ordens de serviço, referentes à extensão total da Adutora, que após serem analisadas foram separadas somente as referentes ao trecho em estudo, sendo de $n=36$.

5.5 Caracterização do trecho em estudo

A adutora se localiza na Avenida José Leonardo Santos, s/nº, no município de Capinzal, e tem a função de transportar água da Casa de Bombas nº10 até o Reservatório nº10. O material das tubulações é de PVC rígido tipo DeFoFo de 150mm de diâmetro e PN 1MPa, possuindo a mesma 1580m de comprimento, com aproximadamente 264 tubos, sendo construída no ano de 1997. No Anexo 1 podemos visualizar o trecho em estudo.

5.6 Método para previsão de quebras em sistemas de abastecimento

Para a realização da análise econômica, uma análise de regressão é usada para desenvolver uma equação que fornece o número de quebras em função do tempo. O software *Statistica* auxiliou na determinação da equação 5.1, que tem o formato exponencial proposto por Shamir e Howard (1979), que possui a seguinte formulação:

$$N(t) = N(t_0).e^{A(t-t_0)} \quad (5.1)$$

onde:

- $N(t)$ é o número de quebras por unidade de comprimento por ano no ano t ;
($Km^{-1}.ano^{-1}$);
- t , é tempo em anos;
- t_0 é o ano base para a análise (o ano que a tubulação foi instalada, ou o primeiro ano na qual dados estão disponíveis);
- A é a taxa para o incremento nas quebras sobre tempo (ano^{-1}).

O número de quebras possuirá a unidade de quebras por comprimento por ano. Na presente análise de determinação do tempo ótimo de substituição de uma adutora,

um ano é usado como período de tempo. O comprimento do trecho corresponde a 1580 metros.

Assume-se que equação estimada via regressão (equação 5.1) consiga reproduzir a vida útil da tubulação. Aplicando-se então um tempo qualquer na equação ora citada é possível estimar o número de quebras futuras.

A equação descrevendo o crescimento no número de quebras sobre o tempo é desenvolvida para um trecho particular da rede, que possui homogeneidade com respeito às causas das quebras – o mesmo material e construção, solo similar e condições de temperatura, pressões de operação e transientes hidráulicos.

O modelo de Equação 5.1 foi escolhido com base em sua extensa citação na literatura científica, e porque os dados necessários para a sua aplicação estão disponíveis.

5.7 Análise econômica

De posse da equação de previsão de quebras com o tempo, é realizada uma análise econômica, que utiliza os seguintes componentes básicos:

- A previsão de quebras nos anos futuros na tubulação existente – obtidos através do uso da equação 5.1;
- O custo para reparar uma quebra – extraído da análise das ordens de serviço;
- O custo para substituir a tubulação existente por uma nova – obtido através de orçamento com empresas fornecedoras e prestadoras de serviço;
- A taxa de amortização que será usada para converter gastos futuros em valores presentes – obtida através do histórico das taxas de inflação no Brasil;
- Todos os custos são expressos em Reais.

A equação 5.1 é usada na análise econômica, que de acordo com Shamir e Howard (1979), como o número de quebras por ano aumenta, consequentemente aumenta também o custo de reparação. Se o custo de reparação de uma quebra C_b , expresso em reais, é assumido ser constante no tempo, então o custo de reparação de quebras em um trecho de tubulações num ano futuro t é:

$$C_m(t) = C_b \cdot N(t) = C_b \cdot N(t_0) \cdot e^{A(t-t_0)} \quad (5.2)$$

Se o ano presente é denominado por t_p , e a taxa de inflação é R , então o valor presente desse custo de manutenção é simplesmente:

$$\frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_p}} \quad (5.3)$$

Denotado por t_r o ano na qual a tubulação será substituída. O valor presente de todos os custos de manutenção (reparos) do presente ano t_p para o ano t_r para um trecho de tubulações é:

$$P_m(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_p}} = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b \cdot N(t_0) \cdot e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}} \quad (5.4)$$

Se a nova tubulação não incorrer em nenhuma quebra, então (5.4) representa todos os custos de manutenção futuros.

O custo de reposição (substituição) de um trecho de tubulações, expresso em reais (R\$) constantes como C_b , é C_r . O valor presente no ano t_p de reposição de um trecho de tubulações no ano t_r é:

$$P_r(t_r) = \frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_p}} \quad (5.5)$$

O tempo ótimo para a substituição é aquele ano no qual o custo total $PT(t_r)$ é mínimo, que corresponde ao ano na qual o crescimento anual em P_m é justamente igual ao decrescimento em P_r . Procura-se portanto, o valor de t_r , denominado t_r^* , que minimiza a Equação (5.6):

$$P_T(t_r) = P_m(t_r) + P_r(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_p}} + \frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_p}} \quad (5.6)$$

$$\underset{t_r}{Min}[P_T(t_r)] = \underset{t_r}{Min} \left[\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b \cdot N(t_0) \cdot e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}} + \frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_p}} \right] \quad (5.7)$$

Diferenciando em relação a t_r , igualando a zero, e resolvendo, obtém-se o tempo ótimo, de acordo com Shamir e Howard (1979):

$$t_r^* = t_0 + \frac{1}{A} \ln \left[\frac{\ln(1+R) \cdot C_r}{N(t_0) \cdot C_b} \right] \quad (5.8)$$

O ano base t_0 usado no desenvolvimento da regressão da Equação (5.1) não tem influência na solução, pois é considerado um processo estacionário. Isto pode ser visto observando que o número de quebras em algum outro ano, dito ano presente t_p , é, da equação (5.1):

$$N(t_p) = N(t_0).e^{A(t_p - t_0)}$$

E portanto, para cada ano futuro t :

$$N(t) = N(t_0).e^{A(t - t_0)} = [N(t_0).e^{A(t_p - t_0)}].e^{A(t - t_p)} = N(t_p).e^{A(t - t_p)} \quad (5.1.1)$$

Deste modo, a equação (5.4) pode ser escrita

$$P_m(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b \cdot N(t_p) \cdot e^{A(t - t_p)}}{(1 + R)^{t - t_p}} \quad (5.4.1)$$

Introduzindo essa expressão na equação (5.7), diferenciando, igualando a zero, e resolvendo em relação a t_r^* , conduz a

$$t_r^* = t_p + \frac{1}{A} \ln \left[\frac{\ln(1 + R) \cdot C_r}{N(t_p) \cdot C_b} \right] \quad (5.8.1)$$

Esta expressão fornece os mesmos resultados que a equação (5.8), demonstrando que o arbitrário ano base t_0 selecionado não tem efeito nos resultados.

5.8 Análise de sensibilidade

Após a determinação do tempo ótimo de substituição, é analisada a sensibilidade de t_r^* para variações em valores dos parâmetros, obtidos através da diferenciação da equação 5.8 com respeito a cada parâmetro (Shamir e Howard, 1979), como segue:

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial A} = \frac{-1}{A^2} \ln \left[\frac{\ln(1 + R) \cdot C_r}{N(t_0) \cdot C_b} \right] \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial R} = \frac{1}{A(1 + R) \cdot \ln(1 + R)} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial N(t_0)} = \frac{-1}{A \cdot N(t_0)} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial C_b} = \frac{-1}{A.C_b} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial C_r} = \frac{1}{A.C_r} \quad (5.13)$$

Estas são as sensibilidades para a mudança em um parâmetro em um tempo, todos os outros parâmetros mantêm seus valores típicos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise dos dados de quebras

A análise das quebras foi realizada utilizando-se trinta e seis (36) ordens de serviço, em um período de 2004 a 2008, referentes ao trecho da adutora em estudo. A Tabela 6.1 apresenta as quebras das tubulações, divididos entre os meses do ano, no período de Janeiro de 2004 até Dezembro de 2008.

Tabela 6.1 – Distribuição das quebras por meses do ano.

Quantidade de Quebras					
	Ano				
Mês	2004	2005	2006	2007	2008
Janeiro		1			1
Fevereiro			1	2	2
Março		1	1		3
Abril		1	2	1	
Maio		2			1
Junho				2	
Julho	1				
Agosto		1			
Setembro			1	2	
Outubro	1				
Novembro			1		
Dezembro	1	2	3		2
Total	3	8	9	7	9

De posse da quantidade total dos dados de quebras por ano, na Tabela 6.2 tem-se o número de quebras dividido pelo comprimento da adutora, por ano (número total de quebras/ 1,58 Km por ano).

Tabela 6.2 - Número de quebras / 1,58Km . Ano

Ano	Total Quebras	Nº Quebras/1,58Km Ano
2004	3	1,899
2005	8	5,063
2006	9	5,696
2007	7	4,430
2008	9	5,696

Os dados de quebras (nº quebras/1,58 Km.Ano) foram graficados contra o tempo. Com o auxílio do software *Statistica* (Gráfico 6.1e 6.2) foi encontrada a equação da evolução das quebras com o tempo, através de uma análise de regressão não linear.

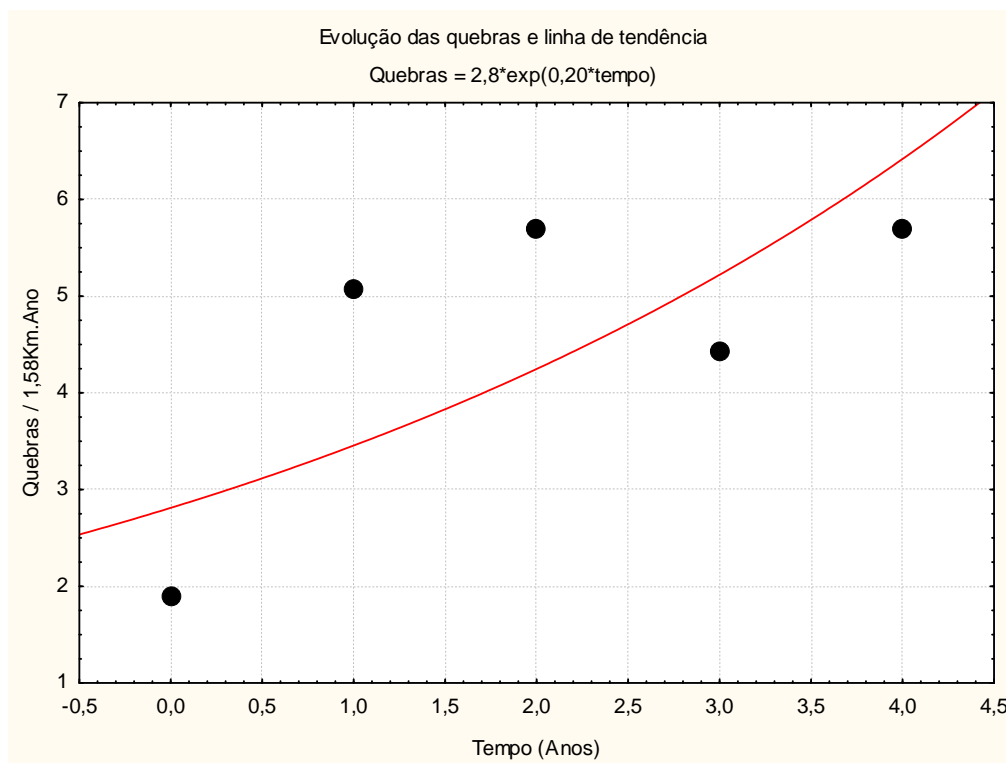


Figura 6.1 – Evolução das quebras e linha de tendência, software *Statistica*.

O coeficiente da taxa de crescimento A encontrado foi de 0,20 com o número de quebras no ano base da análise 2004, $N(t_0)$, igual a 2,8 quebras/1,58Km.Ano. A equação com os dois coeficientes estimados pode ser vista abaixo:

$$N(t) = 2,8.e^{0,20t} \quad (6.1)$$

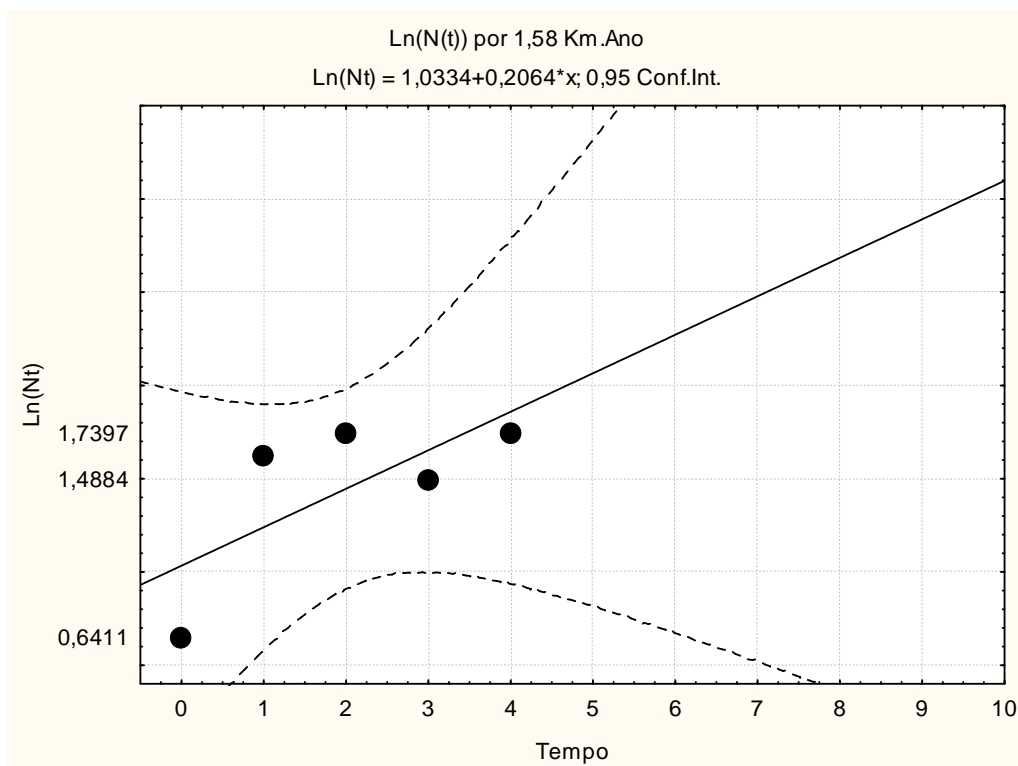


Figura 6.2 – Linha de tendência e intervalo de confiança, equação linearizada. Software Statistica.

Na figura 6.2 podemos visualizar a equação linearizada e com os intervalos de confiança. O coeficiente de correlação encontrado foi de $R^2=0,49$. Foi comprovado através da análise de regressão que não se pode afirmar estatisticamente que a equação encontrada representa a evolução das quebras com o tempo, pois analisando o intervalo de confiança, a partir do quarto ano e fazendo uma previsão para o ano seguinte (quinto ano) esse intervalo se encontra em uma faixa de valores muito ampla, inviabilizando assim a previsão das quebras futuras através da equação encontrada. Isso se deve ao fato de haver muito poucos dados disponíveis para uma análise de regressão.

Para preencher essa lacuna de falta de dados para a previsão de quebras futuras em tubulações é proposto um formulário com sugestões de informações a serem coletadas quando é efetuado um conserto na rede. O modelo desse formulário se encontra no Apêndice 3.

Com o objetivo de explorar a análise econômica, feita a partir da previsão de quebras futuras, é assumido a hipótese da equação 6.1 representar a evolução das quebras com o tempo.

Através do uso da Equação 6.1, realizou-se uma comparação entre os valores de quebras, entre os dados observados e os obtidos através do uso da equação 6.1, e os resultados se encontram na tabela 6.3.

Tabela 6.3 Comparação entre o número de quebras estimado e observado

Comparação - Número de Quebras			
Ano	Estimado	Observado	Diferença
2004	4,44	3	1,44
2005	5,46	8	2,54
2006	6,71	9	2,29
2007	8,25	7	1,25
2008	10,14	9	1,14

Na Figura 6.3 observa-se a evolução das quebras com o tempo, obtido através do uso da Equação 6.1, no período de 2004 a 2020.

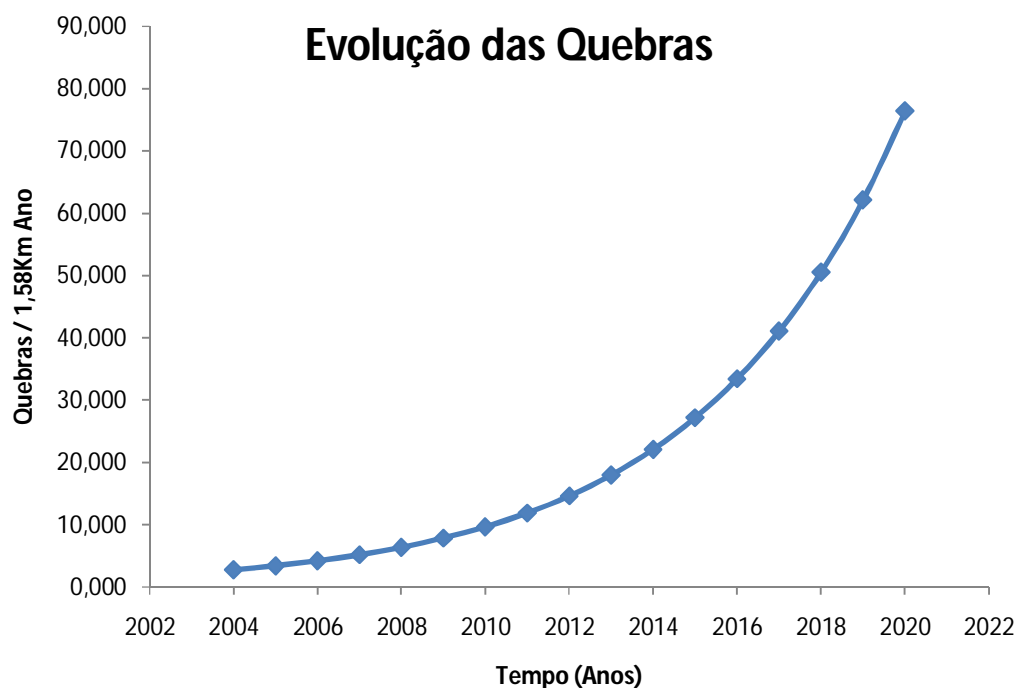


Figura 6.3 - Evolução das quebras com o tempo.

6.2 Análise econômica

O custo para realizar um reparo na adutora (C_b) foi obtido, através da análise das ordens de serviço, fazendo-se uma média dos consertos efetuados no período de

tempo de 2005 a 2008. O ano de 2004 foi excluído, pois um componente usado (luva de correr) nos consertos teve aumento substancial de valor no ano de 2005. Foi usado o valor médio de R\$ 354,5 por reparo na análise econômica. A variação dos custos dos consertos é decorrente do número de funcionários envolvidos, o tempo de execução do serviço, e os materiais utilizados. Maiores detalhes podem ser consultados no Apêndice1.

O custo de reparação aumenta pois o número de quebras por ano aumenta (exponencialmente). O custo de reparação C_b , é assumido ser constante no tempo, então o custo de reparação de quebras no trecho da adutora em estudo em qualquer ano futuro t pode ser obtido através da equação 5.2, e é denominado de $C_m(t)$. A Tabela 6.4 ilustra os resultados da análise econômica.

Tabela 6.4 – Quantidade de quebras $N(t)$ por 1,58Km.Ano e custo de reparação no tempo $C_m(t)$.

Ano	$N(t)$	$C_m(t)=N(t)*R\$354$
2004	2.811	R\$ 996
2005	3.455	R\$ 1,224
2006	4.247	R\$ 1,505
2007	5.221	R\$ 1,850
2008	6.418	R\$ 2,275
2009	7.889	R\$ 2,796
2010	9.698	R\$ 3,437
2011	11.921	R\$ 4,226
2012	14.654	R\$ 5,194
2013	18.013	R\$ 6,385
2014	22.143	R\$ 7,849
2015	27.219	R\$ 9,649
2016	33.458	R\$ 11,861
2017	41.129	R\$ 14,580
2018	50.557	R\$ 17,922
2019	62.147	R\$ 22,031
2020	76.394	R\$ 27,081

O ano presente da análise (t_p) é 2004 e a não-inflacionária taxa de desconto R a ser utilizada foi selecionada através de dois índices utilizados no Brasil para medir a inflação, o IPCA e o INPC, ambos do IBGE, mostrados na Tabela 6.5 abaixo:

Tabela 6.5 – Índices de inflação no Brasil, 2004 - 2008

ANO	Índices de Inflação	
	IPCA (%)	INPC (%)
2004	7.6	6.13
2005	5.69	5.05
2006	3.14	2.81
2007	4.46	5.16
2008	5.9	6.48
Média	5.358	5.126

Para a presente análise foi adotado a taxa de desconto R ligeiramente maior que a média, igual a 6% (0,06).

Tem-se o valor presente de todos os custos de manutenção $P_m(tr)$, obtidos com o uso da Equação 5.4, do ano de 2004 até o ano de 2020 expressos na Figura 6.4.

$$P_m(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_p}} = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b \cdot N(t_0) \cdot e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}} = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{354,5.2,811 \cdot e^{0,2064 \cdot t}}{(1+0,06)^{t-2004}} \quad (5.4)$$

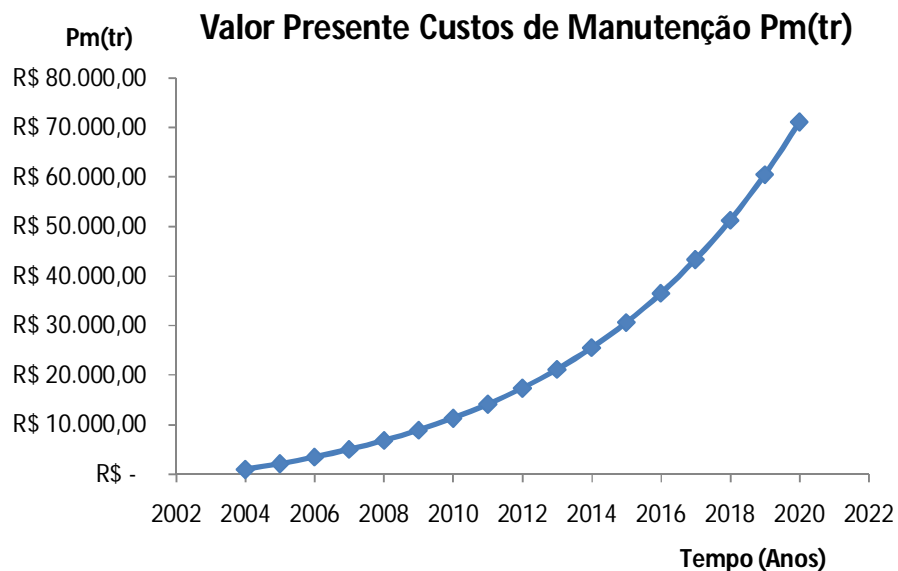


Figura 6.4 – Valor presente dos custos de manutenção.

Os custos para substituir (C_r) os 1580 metros da Adutora DeFoFo 150mm, foram estimados através de orçamentos feitos com empresas fornecedoras de materiais e de serviço, e seus detalhes se encontram no Apêndice 2.

O custo de substituição C_r ficou em R\$ 95.420,96 para substituir os 1580 metros de adutora. O valor presente do custo de substituição $P_r(t_r)$ é dado pela equação 5.5 e expresso na figura 6.5, no período de 2004 a 2020.

$$P_r(t_r) = \frac{C_r}{(1 + R)^{t_r - t_p}} \quad (5.5)$$

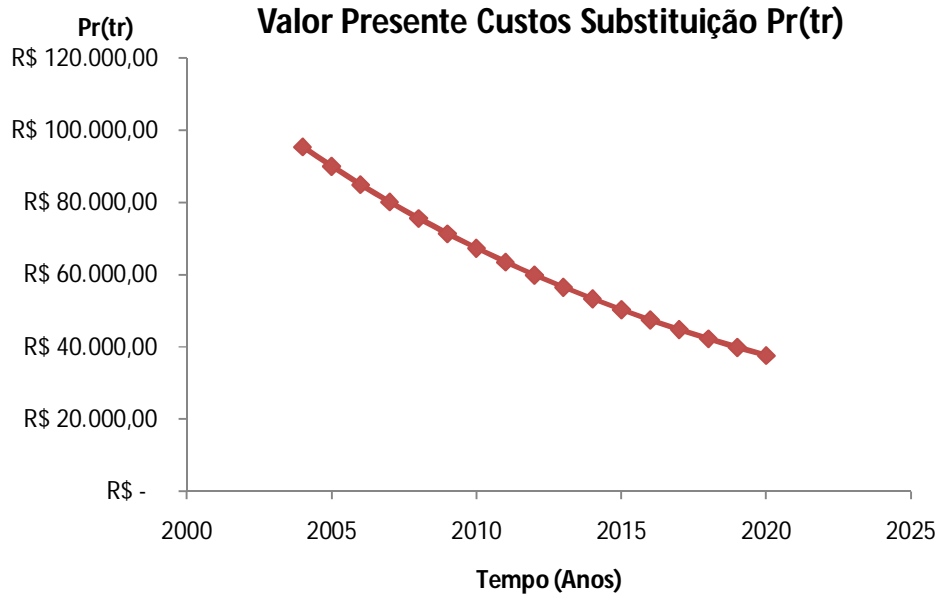


Figura 6.5 – Valor presente dos custos de substituição

De posse dos custos de reparo $P_m(t_r)$ e os custos de substituição $P_r(t_r)$ é calculado o custo total $P_T(t_r)$, expresso pela Equação 5.6 e pode ser visualizado na figura 6.6.

$$P_T(t_r) = P_m(t_r) + P_r(t_r) = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_m(t)}{(1 + R)^{t - t_p}} + \frac{C_r}{(1 + R)^{t_r - t_p}} \quad (5.6)$$

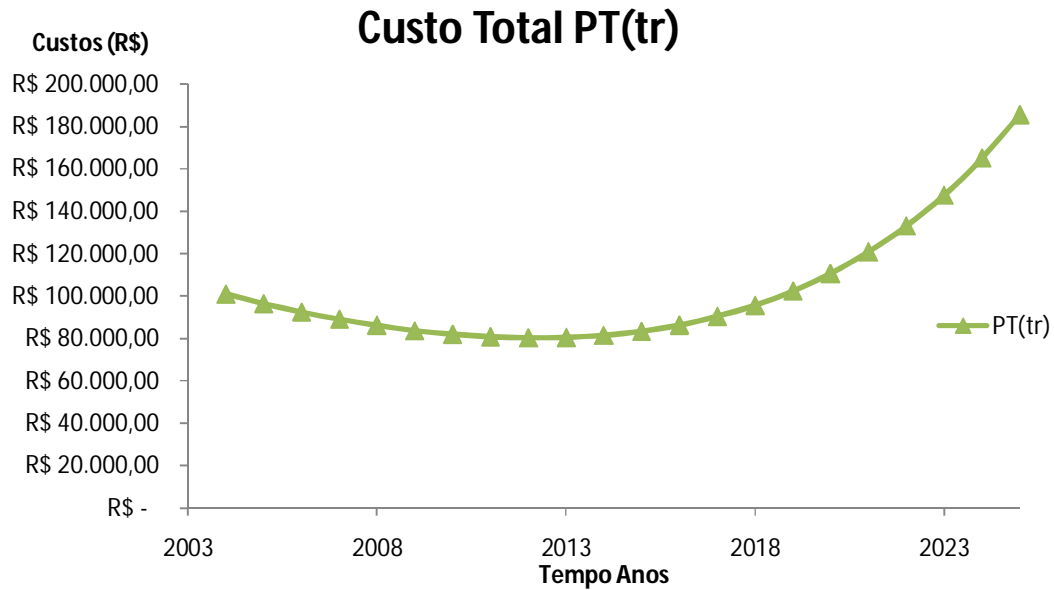


Figura 6.6 – Custo Total PT(tr)

O tempo ótimo de substituição t_r^* , que é aquele em que o custo total é mínimo, é dado pela equação 5.8. Usando-se como dados de entrada os valores apresentados na tabela 6.6, obtém-se o ano ótimo de substituição sobre o ponto de vista da análise econômica, aplicando a equação 5.8.

Tabela 6.6 Dados de entrada para cálculo do tempo ótimo de substituição

Variável	Valor
t_0 – Ano base da análise	2004
$N(t_0)$	2,811
A	0,2064
R	0,06 (6%)
C_r	R\$ 95.420,96
C_b	R\$ 354,5

$$t_r^* = t_0 + \frac{1}{A} \ln \left[\frac{\ln(1+R).C_r}{N(t_0).C_b} \right] = 2004 + \frac{1}{0,2064} \ln \left[\frac{\ln(1+0,06).95420,96}{2,811.354,5} \right] \quad (5.8)$$

$t_r^* = 2012,33$ (Ano ótimo de substituição do trecho da adutora em estudo)

Na Figura 6.7 pode-se visualizar o custo total $PT(tr)$ juntamente com seus dois componentes de origem, os custos de substituição $Pr(tr)$, e os custos de manutenção $Pm(tr)$, bem como o ano ótimo de substituição. Seus valores de origem estão expressos na tabela 6.7. $Pm(tr)$ é uma função crescente de tr , porque para cada ano adicional que passa antes da tubulação ser substituída existe um termo adicional na equação (5.4). Por outro lado, $Pr(tr)$ decresce com tr porque é assumido que C_r é constante, considerando que o denominador aumenta com tr .

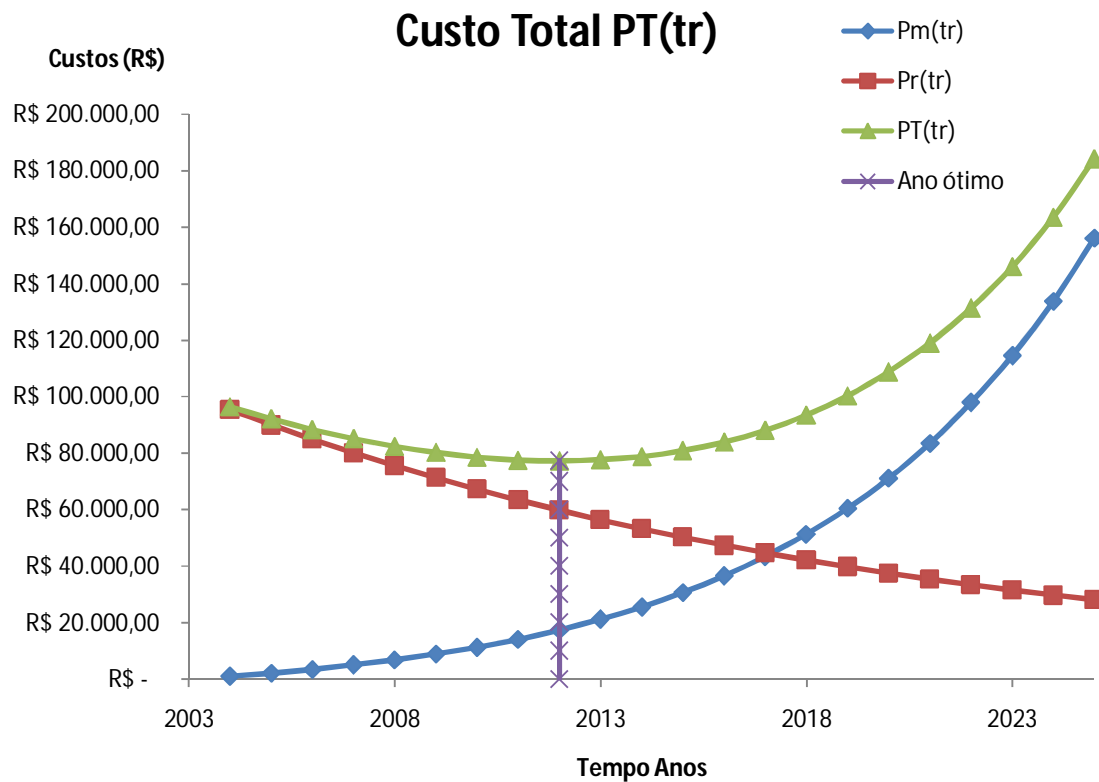


Figura 6.7 – Custo total $PT(tr)$, com seus componentes $Pr(tr)$ e $Pm(tr)$, e o ano ótimo de substituição – 2012,3.

Tabela 6.7 – Custos de manutenção, substituição e custos totais com o tempo.

Ano	Pm(tr)	Pr(tr)	PT(tr)
2004	R\$ 996	R\$ 95.420	R\$ 96.417
2005	R\$ 2.152	R\$ 90.019	R\$ 92.171
2006	R\$ 3.492	R\$ 84.924	R\$ 88.416
2007	R\$ 5.046	R\$ 80.117	R\$ 85.163
2008	R\$ 6.848	R\$ 75.582	R\$ 82.430
2009	R\$ 8.938	R\$ 71.304	R\$ 80.242
2010	R\$ 11.361	R\$ 67.268	R\$ 78.629
2011	R\$ 14.172	R\$ 63.460	R\$ 77.632
2012	R\$ 17.431	R\$ 59.868	R\$ 77.299
2013	R\$ 21.211	R\$ 56.479	R\$ 77.690
2014	R\$ 25.594	R\$ 53.282	R\$ 78.876
2015	R\$ 30.677	R\$ 50.266	R\$ 80.943
2016	R\$ 36.571	R\$ 47.421	R\$ 83.993
2017	R\$ 43.407	R\$ 44.737	R\$ 88.144
2018	R\$ 51.334	R\$ 42.204	R\$ 93.539
2019	R\$ 60.527	R\$ 39.815	R\$ 100.343
2020	R\$ 71.188	R\$ 37.562	R\$ 108.750

Após a determinação do tempo ótimo de reposição foi feita uma análise de sensibilidade com o objetivo de verificar como se comporta esse tempo ótimo t_r^* , quando alteramos um parâmetro e mantemos os outros com seus valores iniciais (tabela 6.1). Foram aplicadas as equações 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, e os resultados encontram-se abaixo:

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial A} = -40,35 \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial R} = 78,44 \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial N(t_0)} = -1,72 \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial C_b} = -0,013 \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial t_r^*}{\partial C_r} = 0,00005 \quad (5.13)$$

Para melhor compreensão da análise de sensibilidade foi elaborada a tabela 6.8, que possui a variação do tempo ótimo tr^* quando se modifica um dos parâmetros. Na coluna 2 tem-se os valores usados para determinar o tr^* , e nas colunas 1 e 3 temos o deslocamento do tempo ótimo em função da variável modificada, como segue:

- Modifica-se a taxa de crescimento de quebras A, inicialmente igual a 0,2064, para 0,15 o ano ótimo será 2014,5. Se aumentarmos a taxa para 0,3 o ano ótimo será em 2008,5.
- Quando altera-se a taxa de desconto R de 0,06 para 0,04 o ano passa a ser 2010,7 e se aumentarmos para 0,08 ele passa para 2013,9.

Resumindo, a coluna 1 nos mostra o ano ótimo se modificamos os parâmetros para valores menores do que os utilizados inicialmente (coluna 2), e na coluna 3 se aumentamos os valores das variáveis.

Tabela 6.8 Análise de sensibilidade

	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
	A		
	0,15	0,2064	0,3
tr^*	2014,6	2012,3	2008,5
	R		
	0,04	0,06	0,08
tr^*	2010,7	2012,3	2013,9
	N(t0)		
	2,5	2,811	3
tr^*	2012,8	2012,3	2012
	Cb		
	R\$ 300,00	R\$ 454,50	R\$ 500,00
tr^*	2013	2012,3	2013
	Cr		
	R\$ 90.000,00	R\$ 94.420,96	R\$ 110.000,00
tr^*	2012	2012,3	2013

7. CONCLUSÕES

A partir de uma análise de ordens de serviço, procedimento comum dentro dos prestadores de serviços de saneamento, pôde ser feita uma análise econômica para se

determinar o tempo ótimo de substituição das tubulações de um trecho do sistema de abastecimento de água, sob a *hipótese* da equação encontrada através da análise de regressão representar a evolução das quebras com o tempo. Embora o prestador tenha disponibilizado esses dados para o estudo, o histórico de quebras de cinco anos se mostrou pequeno para a determinação da equação de evolução das quebras com o tempo. Foi adotado o modelo exponencial para estimar a equação com base na literatura científica, mas como cada sistema possui características únicas, talvez outro formato de equação, como o crescimento linear, fosse mais adequado para o presente caso, o que não pôde ser comprovado pelo pequeno número de dados disponíveis.

É de extrema utilidade que os prestadores de serviços registrem toda a informação necessária para realizar uma avaliação das quebras e suas causas, fazendo um estudo de causa e efeito com o objetivo de correlacionar os dados dos rompimentos com suas possíveis causas, tais como o tipo e temperatura do solo, pressões de serviço, transientes hidráulicos e carregamentos externos. Embora o método empregado para a determinação do tempo ótimo de operação não seja necessário um estudo de causa-efeito, a informação adquirida de tal estudo ajuda na construção de políticas de longo prazo no que se refere a seleção de materiais e procedimentos de construção. Também pode auxiliar em imediatas decisões operacionais na substituição de tubulações.

É muito importante salientar que uma variável envolvida na problemática dos rompimentos em sistemas de abastecimento de água e que não foi considerada na análise, é o custo da água perdida nos vazamentos, e outros custos denominados aqui de custos sociais, que são relativos aos interrompimentos no serviço, obstrução do tráfego, perda da capacidade de combate a incêndios e outros mais, de difícil quantificação. Nos custos da água perdida nas quebras, estão inseridos os custos ambientais, de tratamento da água e energia gasta para o transporte dessa água através das estações elevatórias.

Frequentemente, quicá todo ano, a análise deve ser refeita utilizando-se dados atualizados das quebras e considerando os fatores econômicos correntes, deste modo, o formato da equação da evolução das quebras com o tempo pode ser melhor determinado.

A análise econômica forneceu uma ferramenta de apoio à decisão para o planejamento das companhias, já que usualmente não existe um critério analítico para a gestão das tubulações, e a mesma não é um substituto para um bom julgamento, mas ela mostra um suporte na qual boas decisões podem ser tomadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRE, HELENA ET AL. **Water infrastructure asset management: a methodology to define investment prioritization.** 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Ohio, Usa, 27- 30 ago, 2006.
- CLARK, R. M., STAFFORD, C. L., AND GOODRICH, J. A. **Water distribution systems: A spatial and cost evaluation.** J. Water Resources Planning and Management Division, ASCE, USA, 1982.
- GOULTER, I. C., AND KAZEMI, A. **Spatial and temporal groupings of water main pipe breakage in Winnipeg.** Canadian J. Civil Engrg., 15(1), 91-97, 1998.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água:** Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias. 2ª Edição. 242p. Editora Universitária / UFPB, 2004.
- KLEINER, YEHUDA; RAJANI, BALVANT. **Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models.** Urban Water, Canada, v. 3, n. 3, p.131-150, out. 2001.
- KETTLER, A. J., AND GOULTER, I. C. **An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks.** Can. J. Civil Engrg., 12, 286-293, USA. 1985
- LINDNER, E. A. **Estudos de eventos hidrológicos extremos na Bacia do Rio do Peixe - SC com aplicação de índice de umidade desenvolvido a partir do Tank Model.** Florianópolis, 194 p. Dissertação (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- MORRIS, R.E. **Principal causes and remedies for water main breaks.** Journal of AWWA, USA, 1967.
- RØSTUM, JON. **Statistical modelling of pipe failures in water networks.** 2000. 104 f. Tese (Doutorado) - Norwegian University Of Science And Technology, Trondheim, 2000.
- ROGERS, PETER D.; GRIGG, NEIL S. **Failure assessment model to prioritize pipe replacement in water utility asset management.** 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Ohio, Usa, 27-30 ago, 2006.
- PORTAL DE TURISMO DO GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA
<http://www.sc.gov.br/portalturismo/Default.asp?CodMunicipio=248&Pag=2>, acessado em 10 de maio de 2009.
- SHAMIR, U. E HOWARD, C.D.D. **An analytic approach to scheduling pipe replacement.** 1979. Journal of AWWA, 71(5), 248-258.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Paulo, 2006, 643 p.

WALSKI, T. M., AND PELLICCIA, A. **Economic analysis of water main breaks**. J. AWWA, 74(3), 140-147, 1982.

APÊNDICE 1

Custos de reparos/consertos na Adutora DeFoFo 150 mm

Ano	Consertos	Custo Total		Custo específico	
2004	5/jul	R\$	214,26	Tubo de PVC Rígido tipo DeFoFo PN1Mpa DN 150 mm	R\$ 23,33/m
	1/out	R\$	242,49	Luva de correr DeFoFo DN150mm	R\$ 43,58
	20/dez	R\$	403,97	Funcionários	R\$ 11/hora
	Média	R\$	286,91		
2005	4/jan	R\$	231,40		
	25/mar	R\$	400,88	Custo específico	
	1/abr	R\$	427,76	Tubo de PVC Rígido tipo DeFoFo PN1Mpa DN 150mm	R\$ 35/m
	12/mai	R\$	131,00	Luva de correr DeFoFo DN150mm	R\$ 112,38
	11/mai	R\$	323,38	Funcionários	R\$ 12/hora
	4/ago	R\$	397,26		
	17/dez	R\$	357,76		
	25/dez	R\$	475,38		
	Média	R\$	343,10		
2006	8/fev	R\$	272,98		
	19/mar	R\$	415,72		
	21/abr	R\$	551,20	Custo específico	
	24/abr	R\$	496,98	Tubo de PVC Rígido tipo DeFoFo PN1Mpa DN 150mm	R\$ 35/m
	14/set	R\$	259,76	Luva de correr DeFoFo DN150mm	R\$ 112,38
	17/nov	R\$	259,76	Funcionários	R\$ 13.44/hora
	1/dez	R\$	547,13		
	7/dez	R\$	259,76		
	11/dez	R\$	259,76		
	Média	R\$	369,23		
2007	21/set	R\$	498,85		
	12/set	R\$	451,70	Custo específico	
	5/jun	R\$	259,76	Tubo de PVC Rígido tipo DeFoFo PN1Mpa DN 150mm	R\$ 35/m
	1/jun	R\$	259,76	Luva de correr DeFoFo DN150mm	R\$ 112,38
	30/abr	R\$	277,26	Funcionários	R\$ 13.91/hora
	23/fev	R\$	259,76		
	17/fev	R\$	322,38		
	Média	R\$	332,78		
2008	30/dez	R\$	371,26		
	3/dez	R\$	307,75	Custo específico	
	19/mai	R\$	383,12	Tubo de PVC Rígido tipo DeFoFo PN1Mpa DN 150mm	R\$ 35/m
	27/mar	R\$	573,88	Luva de correr DeFoFo DN150mm	R\$ 112,38
	4/mar	R\$	451,26	Funcionários	R\$ 13.91/hora
	4/mar	R\$	330,62		
	26/fev	R\$	264,33		
	3/fev	R\$	405,82		
	29/jan	R\$	268,04		
	Média	R\$	372,90		
	Média	R\$	340,98	Fonte:Ordens serviço	
	Média sem 2004	R\$	354,5		

APÊNDICE 2


Custos para substituição do trecho						
Localização Adutora do CB-10 até o RS-10 DeFoFo 150mm						
Comprimento do trecho		1580	m	Número de tubulações		264
Capacidade de trabalho da máquina				Dias necessários		
Mínimo	50	m por dia /8hrs		16		
Máximo	150	m por dia /8hrs				
Média	100	m por dia /8hrs				
Número de funcionários		Quantidade	Custo por hora	8hrs	16 dias	
Encanador	1	R\$	13,91	R\$	111,28	R\$ 1.780,48
Ajudante de encanador	2	R\$	10,43	R\$	166,88	R\$ 2.670,08
				Total	R\$ 4.450,56	
Materiais utilizados						Custo
Tubo DeFoFo MP1 , JEI (junta elástica integrada), DN150mm , barra de 6 metros						R\$ 296,10 Unidade
Custo Total						R\$ 78.170,40
Custo máquina		Custo/hora	Custo/Dia	16 Dias		
Orçamento 1		R\$ 100,00	R\$ 800,00	R\$ 12.800,00		
Orçamento 2		R\$ 100,00	R\$ 800,00	R\$ 12.800,00		
Custos totais de substituição do trecho						
Materiais	R\$ 78.170,40					
Mão-de-obra	R\$ 4.450,56					
Máquina	R\$ 12.800,00					
Total	R\$ 95.420,96					

APÊNDICE 3 – Sugestão de informações a serem coletadas pelos prestadores de serviço quando da realização de um reparo na rede de abastecimento, a serem incorporados as ordens de serviço.

- Data;
 - Da quebra
 - Do reparo
- Endereço completo com referência próxima;
- Trecho do sistema onde se encontra o vazamento com seu respectivo comprimento;
- Como foi localizado:
 - Comunicação de terceiros
 - Vísivel
 - Não-visível (geofonamento)
- Características da tubulação
 - Diâmetro
 - Material (tipo, classe de pressão, fabricante, espessura da parede)
 - Tipo de junta
 - Ano de instalação
 - Profundidade de assentamento
 - Proteção interna e/ou externa
- Localização do vazamento
 - Na rede de distribuição
 - Em adutora (água bruta ou tratada)
 - Ramal
 - Cavalete
- Provável causa
 - Má qualidade da peça
 - Berço de assentamento
 - Carregamento externo
 - Transiente hidráulico
 - Interferências de terceiros

- Tipo do vazamento
 - Furo (diâmetro)
 - Rasgo (comprimento)
- Características de operação:
 - Pressão da água
 - Qualidade da água
 - Velocidade da água
 - Corrosão, interna ou externa
 - Tipo de solo
 - Temperatura
 - Águas subterrâneas
- Tempo de intermitência para conserto
- Vazão perdida
- Tempo estimado do vazamento

ANEXO 1 – Ordem de serviço Simae Capinzal.

	SERVIÇO INTERMUNICIPAL DE AGUA E ESGOTO - CAPINZAL / OURO - SC RUA DOMINGOS OMIZOLLO 447 - 4935551107 SÃO LUIZ - CEP: 89.665-000 CNPJ: 82.782.079/0001-14
---	--

Dados detalhados de Serviço

Número da O.S.: 006656 **Ligação:** 06375 **Solicitante:**
Nome do consumidor: SERVIÇO INTER. AGUA E ESGOTO - Hid.: - Tel.: 493555-1107
Endereço: DOMINGOS OMIZOLLO, R., 00000 - SAO LUIZ
Serviço: CONS.REDE DEFOFO DN 150MM **Macro Med.:**

Data de abertura: 20/12/2004 **às:** 08:00
Horários: **Serviço iniciado em:** 20/12/2004 **às:** 13:00
Data de fechamento: 20/12/2004 **às:** 16:00



Observações: Foi consertada rede adutora do CB 10 na rua Jose L. Santos proximo ao Clube do Valco.
 Os funcionarios trabalharam tambem no periodo da manha, das 08:00 as 11:40.

Descrição dos Funcionários e Materiais da O.S.

Código	Nome do Servidor	Horas	Unt.	TOTAL (R\$)
-	ADAO N R DA SILVA	06:40	11.00	73.37
-	IVANCIR J. SILVA	06:40	11.00	73.37
-	JORGE FRANCISCO ETGES	06:40	11.00	73.37
-	JOAO ADELIO SCHASTZ	06:40	11.00	73.37

Código	Descrição do material	Quant.	Unt.	TOTAL (R\$)
00147	LUVA DE CORRER DEFOFO DN 150 MM	2.00	43.58	87.16
00450	TUBO DE PVC RIGIDO TIPO DEFOFO PN1 MPA DN 150 MM (1.00	23.33	23.33

TOTAL DOS VALORES	403.97
-------------------	--------

☐ Atesto que o serviço foi executado

Resp pelo preenchimento:
 GILBERTO

Encarregado do Setor de Emissão

Executor(es)

ANEXO 2 – Localização do trecho de estudo no município de Capinzal (Google Maps, 2009).



ANEXO 3 – Trecho de estudo, Adutora PVC DeFoFo 150mm (cadastro técnico Simae).

